



Marco Tagliabue^a, Camilla Lanari^b

<http://dx.medra.org/10.17374/CI.2026.108.1.46>

^aResearch and Development, Eni SpA, San Donato Milanese (MI), Italia

^bEni Rewind SpA, San Donato Milanese (MI), Italia

marco.tagliabue@eni.com

L'EREDITÀ AMBIENTALE DELLE MINIERE

Il trattamento delle acque acide di miniera (acidic mine drainages, AMD) è essenziale nei siti minerari attivi e dismessi. Lo sviluppo tecnologico deriva soprattutto da studi effettuati negli USA e nel Regno Unito, da cui l'uso estensivo della terminologia anglosassone. I processi passivi, ispirati alla natura e integrabili nel paesaggio, sono interessanti ma non sempre applicabili. È presentato anche un confronto critico con i processi attivi tradizionali basati su reagenti chimici ed fonti energetiche industriali.

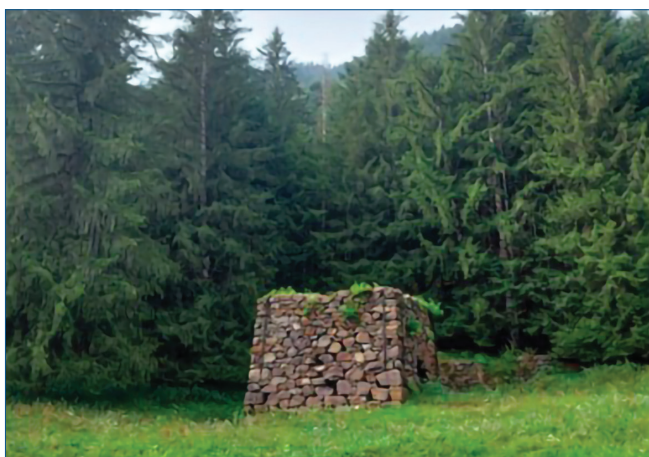


Fig. 1 - Le raglane, i forni per la cottura del minerale di ferro a testimonianza dell'attività estrattiva in Val di Scalve nei pressi di Schilpario (BG), Italia



Fig. 2 - Le roste, i cumuli di detriti dall'attività estrattiva nelle Colline Metallifere nei pressi di Gavorrano (GR), Italia (cortesia di Luca Serbolisca, Eni SpA)

La chimica inorganica in miniera

L'attività estrattiva ha fornito e continua a fornire le fonti di energia e le materie prime essenziali per il progresso tecnologico. Dove si è maggiormente sviluppata ha avuto un impatto pervasivo sul territorio, persistente anche dopo il termine delle operazioni di coltivazione (Fig. 1 e 2). In Italia l'attività estrattiva è stata il nucleo attorno al quale si è sviluppata l'industria, con particolare riferimento a quella dei prodotti chimici di base (e.g., l'acido bórico, l'acido solforico, l'idrossido di sodio, il cloro, i fertilizzanti, gli idrocarburi) [1]. Il caso più eclatante è quello dei siti delle Colline Metallifere in Toscana che hanno progressivamente raggiunto un loro equilibrio ecologico sino a giustificare la creazione di un Parco Nazionale dedicato [2].

L'attività estrattiva non è però solo un retaggio del passato: la carenza degli elementi strategici per l'applicazione delle nuove tecnologie (e.g., il litio, le terre rare, il boro, il rame) sta portando a valutare il riavvio delle operazioni di coltivazione [3] e la valorizzazione dei cumuli di detriti [4].

Le acque reflue provenienti dal drenaggio dei vuoti (i.e., le gallerie ed i pozzi) e dal dilavamento dei cumuli di detriti sono denominate acque acide di miniera, *acidic mine drainages* (AMD) [5]. Si tratta di acque chimicamente aggressive con un pH basso (i.e., generalmente compreso tra 2,0 e 6,0, in casi sporadici addirittura negativo) [6] ed elevati livelli di ioni eco-tossici. Queste devono essere trattate prima del rilascio nell'ambiente (Tab. 1) [7]. Sovente le miniere si trovano in luoghi remoti dove

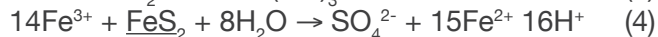
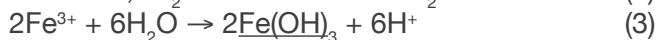
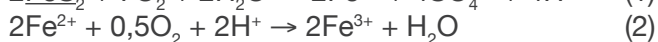


Proprietà	Unità	Limite
pH	-	5,5-9,5
Alluminio	mg/L	1,0
Ferro	mg/L	2,0
Manganese	mg/L	2,0
Solfato	mg/L	1000
Cadmio	mg/L	0,02
Rame	mg/L	0,1
Piombo	mg/L	0,2
Nichel	mg/L	2,0
Zinco	mg/L	0,5

Tab. 1 - Limiti di legge per lo scarico in un corpo idrico superficiale, rispettivamente, per il pH e gli ioni eco-tossici generalmente presenti nelle AMD [7]

l'accesso ai servizi tecnologici e la logistica sono complicati. In più, a meno delle perturbazioni indotte dagli eventi naturali (e.g., la siccità, il gelo, le piogge, gli smottamenti del terreno), la portata e le caratteristiche chimico-fisiche di ciascuna AMD possono mantenersi invariate per decenni o addirittura secoli. Ciò impone lo sviluppo e l'applicazione di tecnologie efficaci, affidabili e sostenibili per lunghissimi periodi di servizio.

La pirite, FeS_2 , anche quando minoritaria nella composizione del minerale, è la principale fonte di acidità (ACY), ferro e solfato. La sua progressiva dissoluzione per ossidazione può essere schematizzata secondo le equazioni 1-4 [5]:

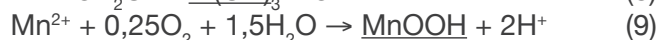
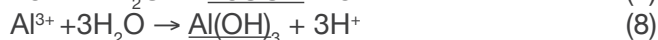
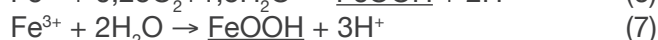
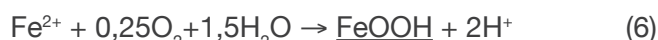


dove, le specie sottolineate sono solidi a temperatura ambiente.

L'alluminio ed il manganese, rilasciati dai feldspati, dalle miche, dalle argille, dai carbonati e dagli ossidi (e.g., l'albite, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, la muscovite, $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$, la caolinite, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, la pirolusite, MnO_2), sono frequentemente presenti come ulteriori ioni eco-tossici, contribuendo alla ACY, generalmente espressa come mg/L di carbonato di calcio, secondo l'equazione 5:

$$\text{ACY} = \left(\frac{3C_{\text{Fe}^{3+}}}{M_{\text{Fe}^{3+}}} + \frac{2C_{\text{Fe}^{2+}}}{M_{\text{Fe}^{2+}}} + \frac{2C_{\text{Mn}^{2+}}}{M_{\text{Mn}^{2+}}} + \frac{3C_{\text{Al}^{3+}}}{M_{\text{Al}^{3+}}} + 1000 \cdot 10^{-\text{pH}} \right) \left(\frac{M_{\text{CaCO}_3}}{2} \right) \quad (5)$$

dove M_{CaCO_3} è il peso molecolare del carbonato di calcio in mg/mole, C_{Men^+} è la concentrazione in mg/L dello ione generico Me^{n+} che reagisce con l'acqua in ambiente ossidante come acido di Lewis per liberare N ioni idrogeno secondo le equazioni 6-9:



dove C_{Men^+} è il peso atomico di Me^{n+} .

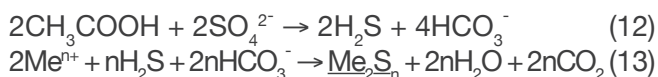
I trattamenti chimico-fisici si basano generalmente sulle equazioni 6-9 in cui il ferro, l'alluminio ed il manganese vengono rimossi dalle AMD come ossidi idrati poco solubili che a loro volta possono fungere da catalizzatori di ossidazione ed adsorbenti di altri ioni eco-tossici eventualmente presenti (e.g., il ferro ossido idrato adsorbe efficacemente gli osso-ioni dell'arsenico e dell'antimonio [8]).

Il carbonato di calcio è uno dei principali donatori di alcalinità, ALK, secondo le equazioni 10, 11:



dove l'equazione 11 si riferisce al tampone tra l'acido carbonico e l'idrogeno-carbonato, in grado di stabilizzare il pH a 6,4 [9]. L'acido carbonico è instabile e tende a decomporsi in anidride carbonica ed acqua. In presenza di una geologia favorevole, si può avere la completa neutralizzazione delle AMD a dare le acque neutre di miniera, *neutral mine drainages* (NMD). In queste comunque permangono livelli elevati di alcuni ioni eco-tossici (e.g., il solfato) [10]. I trattamenti chimico-fisici citati non hanno alcun effetto sul solfato per il quale è stata suggerita la rimozione biologica mediante i batteri solfato-riduttori (SRB). In condizioni riducenti (i.e., tali da determinare un potenziale di ossido-riduzione, *oxidation-reduction potential*, ORP, negativo), con un pH attorno a 7,0 ed in presenza di un substrato organico a basso tenore di carbonio (e.g., l'acido acetico, CH_3COOH), il solfato può essere convertito biologicamente in solfuro che a sua volta può reagire con il ferro, il manganese e gli altri ioni eco-tossici eventualmente presenti, (e.g., lo zinco, il nichel, il rame, il cadmio, il piombo, l'arsenico, l'antimonio),

a dare i rispettivi solfuri poco solubili e generando l'idrogeno-carbonato, secondo le equazioni 12, 13:



dove Me_2S_n è il solfuro poco solubile di Me^{n+} .

Le condizioni riducenti possono essere indotte attraverso l'aggiunta di compost, mentre il pH può essere controllato secondo le equazioni 10, 11.

I principali svantaggi di questo trattamento biologico sono la necessità di un pH controllato per garantire l'efficacia degli SRB ed il potenziale rilascio di gas velenoso idrogeno solforato. Ciò ne impone l'applicazione in ambienti dotati di un sistema di trattamento delle emissioni, preferibilmente chiusi (e.g., gli stessi vuoti delle miniere opportunamente isolati dall'esterno).

Va sottolineato come il solfato sia eco-tossico solo a livelli molto elevati secondo la Tab. 1 [5]. Il suo livello deve essere limitato soprattutto per evitare il deterioramento dei manufatti in calcestruzzo ed in acciaio. A tale scopo, possono essere applicati i trattamenti chimico-fisici basati sulla precipitazione, sullo scambio ionico o sulle separazioni a membrana [11].

I trattamenti attivi ed i trattamenti passivi: come e quando

I trattamenti delle AMD possono seguire un approccio attivo o passivo.

I trattamenti attivi sono basati su reagenti chimici, più raramente biologici e fonti energetiche industriali. Generalmente, comprendono le operazioni di ossidazione, neutralizzazione e sedimentazione, *oxidation, dosing with alkali and sedimentation* (ODAS), con eventuali operazioni aggiuntive per soddisfare le specifiche per l'acqua più rigorose (e.g., lo scambio ionico, le separazioni a membrana, la biodegradazione) [5]. Sono stati gli unici trattamenti disponibili fino agli anni Novanta ed i criteri di progettazione sono ben consolidati essendo basati su apparecchiature convenzionali (e.g., le vasche ed i recipienti in cui far avvenire le reazioni chimiche o biologiche, le pompe idrauliche per la circolazione dell'acqua).

Il reagente ossidante è il perossido di idrogeno ed i reagenti neutralizzanti sono in alternativa il sodio

idrossido, il calcio idrossido, il calcio ossido o l'ammoniaca.

I reagenti sono dosati attraverso dispositivi elettro-meccanici (e.g., le tramogge o le coclee per i solidi, le pompe idrauliche o i regolatori flusso per i fluidi) fino al pH di 8,0 per rimuovere il ferro, l'alluminio ed il manganese, secondo le equazioni 6-9.

Le reazioni chimiche o biologiche avvengono in un'unica fase liquida con tempi di contatto di poche ore.

I trattamenti attivi richiedono una manutenzione frequente.

Sono possibili interventi quotidiani per adattarli alle diverse condizioni ambientali (e.g., la regolazione puntuale delle condizioni d'esercizio in base alle variazioni nella portata o nelle caratteristiche chimico-fisiche delle AMD).

Le infrastrutture dedicate ai trattamenti attivi hanno un'estetica industriale, difficile da integrare nel paesaggio circostante.

Sono disponibili sul mercato unità compatte trasportabili anche in luoghi remoti.

I trattamenti passivi sono basati su agenti chimici o biologici e fonti energetiche naturali [5]. Va sottolineato come non siano semplici operazioni di rinaturalizzazione ma siano invece veri e propri processi chimici non-convenzionali, ispirati ai meccanismi naturali di risanamento. Le prime applicazioni pionieristiche risalgono agli anni Ottanta ed i criteri di progettazione rimangono parzialmente empirici, nonostante gli studi effettuati soprattutto nei Paesi con un'attività estrattiva importante (e.g., gli USA, il Regno Unito, a seguito della dismissione di parte dell'attività estrattiva nazionale negli anni Novanta) [12-16]. La circolazione dell'acqua avviene attraverso canali, lagune, dreni e zone umide artificiali seguendo il gradiente topografico. Il reagente ossidante è l'ossigeno atmosferico e l'ossidazione avviene promuovendo il contatto mediante cascate o percorsi tortuosi artificiali. Il reagente neutralizzante è il calcare, preferibilmente ricco di calcite, CaCO_3 , fino al pH di 6,4, secondo le equazioni 10, 11 e la neutralizzazione avviene mediante la percolazione attraverso dreni calcarei o lo scorrimento in canali artificiali disseminati di ciottoli di calcare. Conseguentemente, le reazioni chimiche o biologiche avvengono alle inter-fasi. Ciò rende necessari tempi di contatto di molte ore, ottenibili mediante infra-



strutture di grandi dimensioni, nonostante i recenti tentativi di compattazione [17].

I trattamenti passivi richiedono una manutenzione poco frequente anche se regolare.

Non sono possibili interventi quotidiani per adattarli alle diverse condizioni ambientali e questa loro rigidità può ridurne l'efficacia al verificarsi di condizioni ambientali impreviste o estreme.

Le infrastrutture dedicate ai processi passivi hanno un'estetica naturale, facile da integrare nel paesaggio circostante.

L'investimento in conto capitale, *capital expenditure* (CAPEX), è generalmente maggiore di quello dei corrispondenti trattamenti attivi a causa delle opere civili necessarie per la costruzione delle infrastrutture di grandi dimensioni, mentre il costo operativo, *operating expenditure* (OPEX), è inferiore grazie alla manutenzione poco frequente.

L'analisi del ciclo di vita, *life-cycle analysis* (LCA), favorisce i trattamenti passivi, soprattutto per le applicazioni più piccole [18].

Entrambi gli approcci devono considerare la gestione dei rifiuti prodotti (e.g., i fanghi, i concentrati liquidi generalmente non-biodegradabili). Devono anche essere gestiti il monitoraggio ambientale, la manutenzione (e.g., i lavaggi delle vasche e delle tubazioni, il dragaggio delle lagune e delle zone umide artificiali, le reintegrazioni del calcare e del compost, rispettivamente), i vincoli di sicurezza, i criteri di cessazione della qualifica di rifiuto, *end of waste* (EoW), nel caso dell'impiego di scarti provenienti da altri processi (e.g., gli scarti agricoli utilizzati per la preparazione del compost) e le esigenze delle parti interessate (e.g., gli Enti, l'opinione pubblica). In base a questa lunga lista di attività imprescindibili, l'aggettivo "passivi" è fuorviante, lasciando intravedere una capacità di auto-regolazione di questo tipo di trattamenti tale da non richiedere alcun intervento umano.

Per i trattamenti passivi sono disponibili alberi decisionali basati sulle caratteristiche chimico-fisiche delle AMD e del sito minerario, per una corretta progettazione (Fig. 3) [5, 13, 16, 19].

Per portate superiori a 50 L/s (4320 m³/d), ACY superiori a 800 mg/L di calcio carbonato (i.e., indice di alti livelli di ferro, alluminio e manganese, secondo l'equazione 5), pH inferiori a 2,0, i trattamenti attivi sono l'opzione migliore [19]. Così anche nel caso lo



Fig. 3 - La caratterizzazione chimico-fisica delle AMD è il primo passo (cortesia di Luca Serbolisca, Eni SpA)

spazio disponibile presso il sito minerario sia limitato, come verrà illustrato nel paragrafo successivo. La tendenza è verso un'applicazione sinergica dei due approcci in modo da sfruttare i rispettivi vantaggi (Tab. 2), a dare i trattamenti semi-passivi (e.g., circolazione dell'acqua tra le lagune artificiali attraverso pompe idrauliche mosse da energie rinnovabili, aggiunta di flocculanti di origine industriale per favorire la sedimentazione, inserimento di bio-reattori tradizionali per il controllo puntuale dell'attività batterica, applicazione di sistemi di controllo remoto di processo) [20].

Un caso-studio di trattamento passivo

Il trattamento passivo delle AMD contenenti ferro, alluminio e manganese può essere organizzato secondo una sequenza di operazioni (Fig. 4) [12]:

- neutralizzazione dell'acqua in ingresso mediante percolazione attraverso un dreno calcareo ridu-

Caratteristiche	Trattamenti Attivi	Trattamenti Passivi
Progettazione	+	-
Manutenzione	-	+
Flessibilità	+	-
Dimensioni	+	-
Estetica	-	+
CAPEX	+	-
OPEX	-	+

Tab. 2 - Trattamenti attivi vs. trattamenti passivi delle AMD (+: vantaggioso; -: svantaggioso). Per il significato degli acronimi e gli ulteriori dettagli si rimanda al testo

cente, *reducing and alkalinity producing system* (RAPS), per un tempo di contatto di almeno 14 ore fino all'instaurazione di un pH di 6,4, secondo le equazioni 10, 11. Il percolato viene raccolto sul fondo del RAPS attraverso una rete di tubazioni forate collegate ad un sifone. Le condizioni riducenti, indotte aggiungendo un substrato organico al calcare servono per limitare l'ossidazione del ferro e la conseguente precipitazione del rispettivo ossido idrato all'interno del dreno calcareo sino a causare la passivazione del calcare (*armoring*), o addirittura l'intasamento. Diversamente, per l'alluminio che ha un solo numero di ossidazione, il rischio di precipitazione del rispettivo ossido idrato permane. Pertanto, i RAPS sono sconsigliati per le AMD con livelli di alluminio maggiori di 1 mg/L;

- ossidazione dell'acqua in uscita dal RAPS mediante una serie di cascate artificiali per favorire il contatto con l'ossigeno atmosferico con la rimozione massiva del ferro e dell'alluminio come ossidi idrati, secondo le equazioni 6-8. Questi sono successivamente sedimentati in una laguna artificiale. La rimozione del manganese secondo l'Equazione 9 è poco efficiente, per cui è necessaria un'operazione dedicata;
- rimozioni, rispettivamente, del manganese e del ferro residuo dall'acqua in uscita dalla laguna artificiale in una zona umida aerobica artificiale (*aerobic wetland*, AeW), in presenza di batteri ossidanti. Il ferro, se presente in forma ridotta, inibisce la rimozione del manganese. Le AeW sono lagune poco profonde, disseminate di ciottoli di calcare e piantumate per facilitare il contatto dell'acqua con l'ossigeno atmosferico ed indurre la rizo-filtrazione (*i.e.*, i fasci di radici agiscono sia da contattori che da filtri). La rimozione del manganese avviene secondo equazioni 15, 16 [5]:

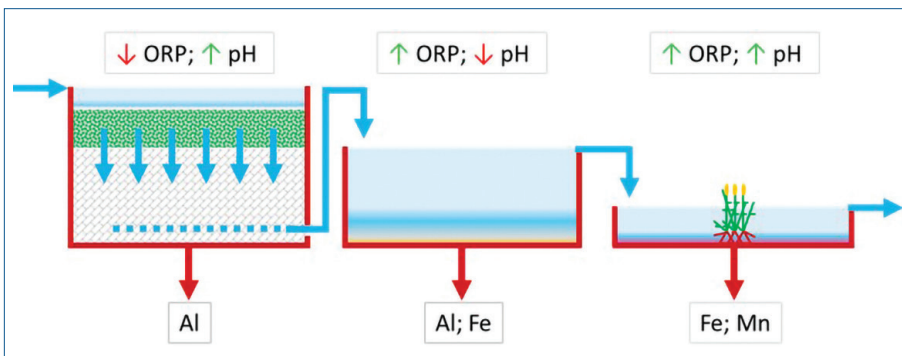
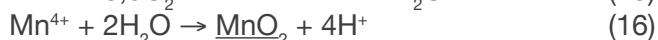


Fig. 4 - Un possibile trattamento passivo delle AMD. Da sinistra verso destra: il RAPS per la neutralizzazione e la rimozione parziale dell'alluminio (in verde il substrato organico; in grigio il calcare); le cascate e la laguna artificiale per le rimozioni massive del ferro e dell'alluminio; la AeW per la rimozione massiva del manganese e parziale del ferro. Per il significato degli acronimi e gli ulteriori dettagli si rimanda al testo

Supponendo una portata di AMD di 2 L/s (173 m³/d), con un livello di manganese di 20 mg/L, da rimuovere fino a 2,0 mg/L per lo scarico in un corpo idrico superficiale (Tab. 1) [7], lo spazio richiesto dalla sola AeW è pari a 622 m², secondo il tasso medio di rimozione del manganese di 5,0 g/(d·m²) riportato in letteratura [16]. È una richiesta di spazio importante che non comprende le infrastrutture ancillari da attivare nei casi di manutenzione o emergenza (*e.g.*, le lagune di accumulo ed omogeneizzazione delle AMD, i sistemi di controllo-lavaggio).

Conclusioni

L'approccio ispirato ai meccanismi naturali di risanamento, l'estetica facilmente integrabile nel paesaggio e la novità rendono intriganti i processi passivi di trattamento delle AMD. La loro applicabilità è però preclusa nel caso di portate e ACY particolarmente elevate. I processi passivi non sono inoltre applicabili in siti minerari con una limitata disponibilità di spazio. In questi casi, i tradizionali trattamenti attivi rimangono la soluzione migliore. La tendenza è verso un'applicazione sinergica dei due approcci a dare i trattamenti semi-passivi, traendo vantaggio dai sistemi sempre più efficienti per lo sfruttamento delle energie rinnovabili e per il controllo remoto di processo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Amat di San Filippo, The Italian Chemical Industry from 1861 to 1918 in The Chemical Industry in Europe, 1850-1914: Industrial



- Growth, Pollution and Professionalization, Springer Nature, Dordrecht (NL), 1998, DOI: [10.1007/978-94-017-3253-6](#)
- [2] Un Viaggio attraverso miniere, storia, natura ed innovazione, Parco Nazionale delle Colline Metallifere, <https://parcocollinemetallifere.it/> ultimo accesso 18 agosto 2025.
- [3] ISPRA, Materie Prime Critiche: ecco quali e dove si trovano, ISPRA, Roma, I, 2024, <https://www.isprambiente.gov.it/files2024/area-stampa/comunicati-stampa/comunicato-stampa-materie-prime.pdf>, ultimo accesso 12 novembre 2025.
- [4] H.M. Stander, J.L. Broadhurst, *Resources*, 2021, **10**, 35, DOI: [10.3390/resources10040035](#)
- [5] P.L. Younger, S.A. Banwart, R. Hedin, *Mine Water - Hydrology, Pollution, Remediation*, Springer Nature, Dordrecht (NL), 2002, DOI: [10.1007/978-94-010-0610-1](#)
- [6] D.K. Nordstrom, D.W. Blowes, *et al.*, *Appl. Geochem.*, 2015, **57**, 3, DOI: [10.1016/j.apgeochem.2015.02.008](#)
- [7] MASE, Attuazione Direttiva 91/271/CEE, MASE, Roma, I, 2025, <https://www.mase.gov.it/portale/attuazione-direttiva-91-271-cee>, ultimo accesso 18 agosto 2025.
- [8] M. Tagliabue, R. Bagatin *et al.*, *Desal. Water Treat.*, 2017, **69**, 294, DOI: [10.5004/dwt.2017.0664](#)
- [9] G. Charlot, *Analisi Chimica Quantitativa - Equilibri in Soluzione*, Piccin, Padova, 1977.
- [10] G. Nielsen, I. Hatam *et al.*, *Water Res.*, 2018, **140**, 268, DOI: [10.1016/j.watres.2018.04.035](#)
- [11] H. Runnti, E.T. Tolonen *et al.*, *Environ. Research*, 2018, **167**, 207, DOI: [10.1016/j.envres.2018.07.018](#)
- [12] P.L. Younger, *Passive Treatment of European Mine Waters: The European Commission's PIRAMID Project*, International Mine Water Association, IMWA, Symposium, Belo Horizonte, BR, 2001, https://www.imwa.info/docs/imwa_2001/Passive.pdf, ultimo accesso 26 agosto 2025.
- [13] PIRAMID, Engineering Guidelines for the Passive Remediation of Acidic or Metalliferous Mine Drainage and Similar Wastewaters, EU 5th framework RTD project # EVK1-CT-199 Passive in-situ remediation of acidic mine and industrial drainage, PIRAMID, University of Newcastle upon Tyne, Newcastle Upon Tyne, GB, 2003, <https://www.imwa.info/piramid/files/PIRAMIDGuidelinesv10.pdf>, ultimo accesso 18 agosto 2025.
- [14] G.R. Watzlaf, K.T. Schroeder, *et al.*, *The Passive Treatment of Coal Mine Drainage*, USDoE, Pittsburgh, USA, 2004, https://static1.squarespace.com/static/66538a984fd76619def08681/t/66aa78e24fffc267d00c0f1d/1722448098274/DOE_Passive_Treatment_Manual.pdf, ultimo accesso 18 agosto 2025.
- [15] D. Barrie Johnson, K.B. Hallberg, *Rev. Environ. Sci. Bio/Technol.*, 2002, **1**, 335, DOI: [10.1023/A:1023219300286](#)
- [16] J. Skousen, C.E. Zipper *et al.*, *Mine Water Environ.*, 2017, **36**, 133, DOI: [10.1007/s10230-016-0417-1](#)
- [17] D. Sapsford, A. Barnes *et al.*, *Mine Water Environ.*, 2007, **26**, 243, DOI: [10.1007/s10230-007-0012-6](#)
- [18] T.J. Hengen, M.K. Squillace *et al.*, *Resour. Conserv. Recycl.*, 2014, **86**, 160, DOI: [10.1016/j.resconrec.2014.01.003](#)
- [19] D. Trumm, *N.Z. J. Geol. Geophys.*, 2010, **53**, 195, DOI: [10.1080/00288306.2010.500715](#)
- [20] R. Kleinmann, A. Sobolewsky *et al.*, *Mine Water Environ.*, 2023, **42**, 170, DOI: [10.1007/s10230-023-00922-w](#)

The Environmental Heritage of Mines

The treatment of acidic mine drainage (AMD) is essential at both active and abandoned mining sites. Technological development has mainly resulted from studies conducted in the USA and the United Kingdom, which explains the extensive use of Anglo-Saxon terminology. Passive treatment processes, inspired by natural systems and easily integrated into the surrounding landscape, are appealing but not always applicable. A critical comparison with traditional active treatment processes based on chemical reagents and industrial energy sources is also presented.